

Report 030\_2017

**FUNKTIONELLE UND BIOMECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON  
SICHERHEITSSCHUHEN:  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM BAAK GO&RELAX SYSTEM**

Prof. Dr. G.-P. Brüggemann

Institut für Biomechanik und Orthopädie, Deutsche Sporthochschule Köln

Köln, 01.08.2017

## Vorbemerkung

Gegenstand dieses Reports sind drei experimentelle biomechanische Untersuchungen zur wissenschaftlichen Fundierung des BAAK Go&Relax Konzeptes für den funktionellen Sicherheitsschuh und des BAAK Fitting Systems zur Anpassung des Sicherheitsschuhes an die morphologischen und funktionellen Eigenschaften des Fußes des Schuhnutzers. Drei wissenschaftliche Untersuchungen analysieren die biomechanischen und mechanischen Eigenschaften der Sicherheitsschuhe nach dem BAAK Go&Relax Konzept und ergänzend die individuelle Schuhanpassung mit medial adaptierbaren BAAK Fitting Elementen. Diese Untersuchungen werden im Folgenden erläutert und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

## Baak Go&Relax

Sicherheitsschuhe nach den BAAK Go&Relax Konzept enthalten sechs technische Elemente, die in ihren Zusammenspiel die anatomischen und biomechanischen Besonderheiten und Funktionen des menschlichen Fußes unterstützen, nutzen und bei allen technischen Einzelheiten konsequent berücksichtigen. Dazu dürfen insbesondere beim Gehen auf ebenem aber auch auf unebenem Untergrund die natürlichen, funktionellen Bewegungen der Gelenke des Fußes nicht gestört oder verhindert, jedoch kontrolliert ermöglicht werden. BAAK Go&Relax soll mit seinen technischen Lösungen helfen, der Biomechanik der Gelenke vom Fuß bis zum Hüftgelenk, der Bindegewebe und auch der intrinsischen und extrinsischen Muskeln vor allem des Fußes gerecht zu werden. Bewegungen sollen durch die Schuhtechnologie kontrolliert und nicht diktiert werden, sie sollen funktionell und physiologisch gestaltet werden, übermäßige Ermüdung soll verhindert werden und die notwendige Sicherheit muss gegeben sein. BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe sind sowohl für ein ermüdungsarmes Stehen, besonders aber auf einen funktionellen und entspannten Gang konzipiert.

Sechs technische Elemente erlauben die angestrebten Funktionen und werden auf ihren resultierenden Effekt in Bezug auf Bewegungen von Fuß und Sprunggelenk sowie die biomechanischen Belastungen des Fußes, des Sprunggelenks aber auch des Kniegelenks beim normalen Gang untersucht.

Im Einzelnen finden sich im BAAK Go&Relax Sicherheitsschuh

- (1) eine asymmetrische Sicherheitskappe zum Schutz der Zehen,
- (2) ein optimierter und biomechanisch begründeter Flexionsbereich für die Zehengrundgelenke (Metatarsal-Phalangeal-Gelenke),
- (3) segmentierte und anatomisch begründete Abdruck- oder Abstoßzonen der Metatarsalköpfe aller Fußstrahlen,
- (4) ein H-Koppel-Element, welches zu einem den Rückfuß mit dem Vorfuß dynamisch koppelt und gleichzeitig eine elastische Verbindung des lateralen und des medialen Fußes schafft,
- (5) ein viscoelastisches Mittelsohlenmaterial mit geringer Energiedissipation, und
- (6) einer funktionellen und innovativen Geometrie der Laufsohle im Fersenbereich für eine optimale und komfortable Abwicklung nach dem Fußaufsatz („smooth ride“).

All diese technischen Elemente tragen in ihrer Gesamtheit und in ihrem Zusammenspiel zu den Funktionen der Schuhe bei. Die technische Umsetzung wird durch die im Folgenden dargestellten Untersuchungen evaluiert und wissenschaftlich belegt.

# **Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und der longitudinalen Steifigkeit von BAAK Go&Relax im Vergleich zu traditionellen Sicherheitsschuhen**

## **Einleitung**

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe und vor allem des Biegeverhaltens und der longitudinalen Steifigkeit erfolgt in zwei getrennten und methodisch unterschiedlichen Studien.

In der ersten Studie (Studie 1) wird das Biegeverhalten und die Flexionsgeometrie von zwei BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen (RICK 2, UNITY) mit asymmetrischer Zehenkappe und einem traditionellen Sicherheitsschuh (RICK) mit drei erwachsenen Probanden flouroskopisch beim langsamen Gang studiert.

Die zweite Studie (Studie 2) erstellt einen Benchmark Test und vergleicht das Biegeverhalten von drei BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen (BAAK HENK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY) mit dem von sieben traditionellen Sicherheitsschuhen verschiedener Hersteller im verblindeten, standardisierten Materialtest in der Materialprüfmaschine. Neben der Biegesteifigkeit im Bereich der Zehengrundgelenke wird die Energiedissipation der Sohlen der insgesamt zehn Sicherheitsschuhe untersucht.

## **Studie 1: Biegegeometrie von BAAK Go&Relax und traditionellen Sicherheitsschuhen**

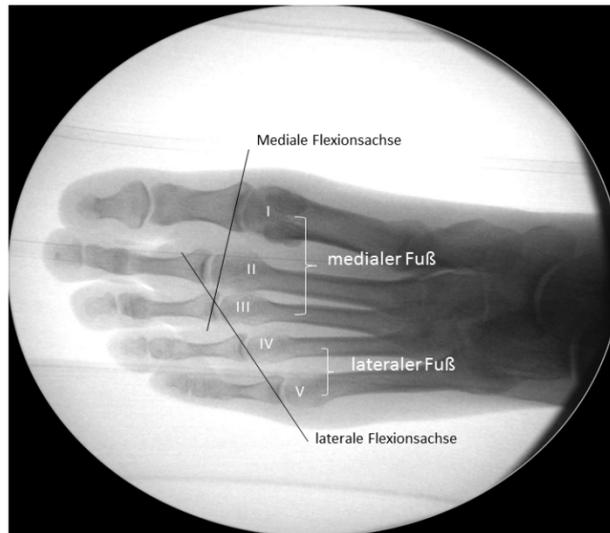
### **Untersuchungsziel**

Gegenstand und Ziel der Studie 1 ist die Analyse des Biegeverhaltens und der Biegelinie in den Zehengrundgelenken bei der Abwicklung des Fußes bei normalen Gang mit BAAK Go&Relax und traditionellen Sicherheitsschuhen.

### **Methodik**

Die Untersuchung erfolgt röntgenkinematisch mit medio-lateralem (m-l) und latero-medialem (l-m) Strahlengang unter Verwendung eines GE-OEC Fluorostar C-Bogens mit einer Aufnahme Frequenz von 30 B/s.

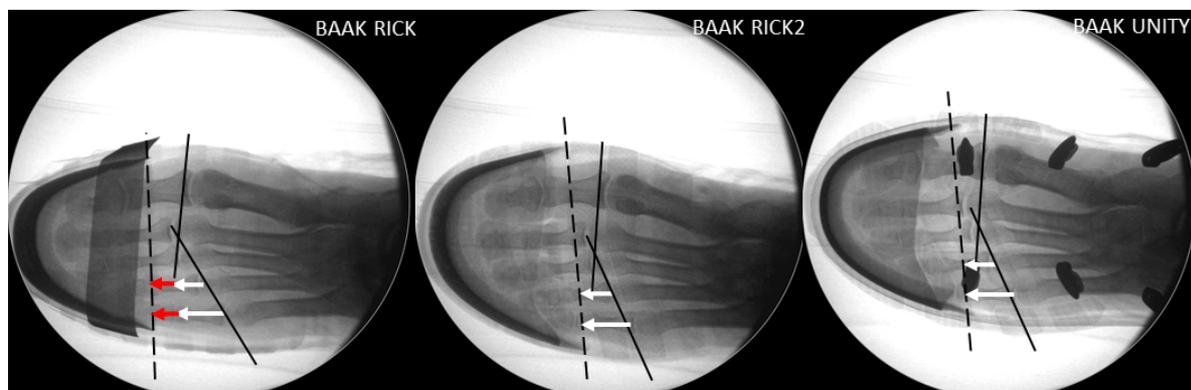
Als Probanden stellten sich 3 erwachsene und Fuß gesunde Männer zur Verfügung. Die Strahlendosis des Fluoroskopes wurde durch Voruntersuchungen am Präparat auf ein Minimum reduziert und kann als gesundheitlich unkritisch eingeordnet werden. Als Schuhe werden BAAK UNITY und BAAK RICK 2 (beide mit BAAK Go&Relax) und BAAK RICK als traditioneller Sicherheitsschuh ohne BAAK Go&Relax Technologie berücksichtigt. Im Erfassungsbereich des Fluoroskopes führen die Probanden jeweils einem Gangzyklus pro Schuhbedingung mit m-l und l-m Strahlengang durch.



**Abbildung 1:** Mittel- und Vorfuß in der Aufsicht. Die medialen Strahlen I bis III bilden den medialen Fuß, die Strahlen IV und V den lateralen Fuß. Die Flexionsachsen der Zehengrundgelenke und damit die Biegelinien zwischen Zehen und Mittelfuß sind medial deutlich unterschiedlich von der lateralen Seite. Ein funktioneller Schuh muss die unterschiedlichen anatomischen Knicklinien erlauben und sowohl die mediale als auch die laterale Flexionsachse berücksichtigen.

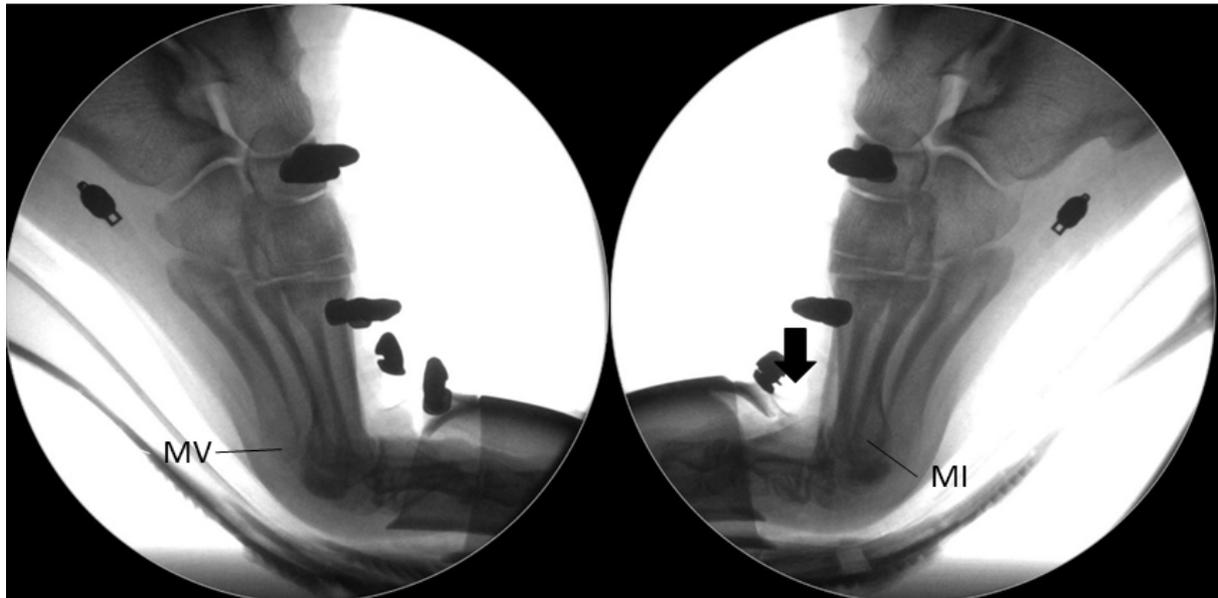
## Ergebnisse

Die durch die asymmetrische Zehenkappe des BAAK Go&Relax Systems unterschiedlich für den medialen und lateralen Fuß angelegten Flexionszonen und durch die segmentierten Abstoßareale gelingt mit dem BAAK Go&Relax System im Gegensatz zum traditionellen Sicherheitsschuh eine störungsfreie Dorsalflexion aller fünf Metatarsal-Phalangeal-Gelenke (Zehengrundgelenke) entsprechend ihrer anatomischen Positionierung. Die unterschiedlichen Flexionszonen des lateralen und medialen Fußes und die asymmetrische Schutzkappe erlauben die funktionelle Abwicklung über den lateralen zum medialen Fuß. Abbildung 2 verdeutlicht die durch die asymmetrisch Zehenkappe optimierte und anatomisch korrekte Lage die Biegezone des BAAK Go&Relax System. Das traditionelle symmetrische Schutzkappensystem dagegen zwingt dem Vorfuß eine anatomisch ungeeignete und unphysiologische Biegelinie auf. Dies muss bei jedem Schritt zu einer Zwangsbewegung des Vorfußes und vor allem der Zehengrundgelenke führen. Die anatomisch unkorrekte Knicklinie und die damit unphysiologische Bewegung der Zehengrundgelenke wird im traditionellen Sicherheitsschuh zu Fehlbelastungen und ggf. über die Tragedauer zur funktionellen und morphologischen Schädigung führen können.



**Abbildung 2:** Zwangsbiegelinien durch die Fersenkappe (gestrichelte Linien) bei traditioneller Zehenkappe (Links) beim BAAK RICK und bei asymmetrischen Fersenkappen (Mitte und Rechts) bei BAAK RICK 2 und BAAK UNITY (rechts). Die asymmetrische Zehenkappe erlaubt eine Kompromissbiegezone und berücksichtigt sowohl die mediale als auch die laterale Flexionsachse.

Es konnte bei allen Probanden nachhaltig gezeigt werden, dass durch die BAAK Go&Relax Technologie mit der asymmetrischen Zehenkappe die funktionelle Bewegung (Dorsalflexion) der Zehengrundgelenke ermöglicht wird. Eine bei dem traditionellen Sicherheitsschuh beobachtete Zwangsbewegung insbesondere des lateralen (äußeren) Vorfußes kann unterbunden werden (Abbildung 2). Damit wird durch das BAAK Go&Relax System auch die funktionell korrekte Abwicklung vom lateralen Fuß zum medialen Fuß beim Abstoß gestattet und unterstützt. Beim traditionellen Sicherheitsschuh dagegen verbleibt der Kraftangriffspunkt der Bodenreaktionskräfte beim Abstoß eher auf dem mittleren Vorfußsegment (dritter und vierter Strahl) und die physiologische Re-Supination des Fußes beim Abdruck wird gestört.



**Abbildung 3:** Abwicklung der Zehengrundgelenke im BAAK UNITY mit asymmetrischer Zehenkappen im lateralen (links) und medialen (rechts) Strahlengang. Die Kompromissbiegeline der Kappe erlaubt eine funktionelle und störungsfreie Abwicklung zuerst des lateralen und dann des medialen Fußes. Die Kappe stößt auch bei maximaler Flexion nicht knöchern an (siehe schwarzer Pfeil) und kompromittiert somit nicht die Mittelfußknochen beim Abdruck vom Boden während des Gehens.

## Diskussion

Mit der asymmetrischen Zehenkappe und der speziellen Anordnung der Flex Zonen der Laufsohle des BAAK Go&Relax Systems gelingt im Gegensatz zum traditionellen Sicherheitsschuhkonzept nachhaltig ein Beitrag zu Verbesserung der physiologischen Bewegung des Fußes, der Fußabwicklung und damit zur funktionellen Beanspruchung der Gelenke des gesamten Fußes.

Die physiologische Abwicklung des Fußes beim Gang wird durch BAAK Go&Relax ermöglicht und unterstützt. Die BAAK Go&Relax Technologie verbessert den entspannten Gang, vermeidet Zwangsbewegungen des Fußes und reduziert die Belastung der Gelenke des Fußes, der intrinsischen und extrinsischen Fußmuskeln. Der Gang wird mit BAAK Go&Relax somit ermüdungsärmer.

## Projekt 2: Biegeverhalten und longitudinale Steifigkeit von Sicherheitsschuhen

### Untersuchungsziel

Untersuchungsgegenstand dieses Teilprojektes ist die Analyse des Biegeverhaltens und der für die Vorfußverformung notwendigen Drehmomente von BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen und traditionellen Sicherheitsschuhen im Sinne eines verblindeten Benchmark Tests.

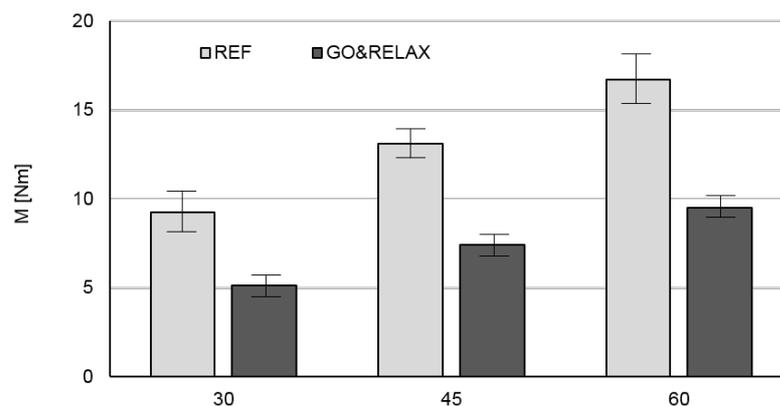
### Methodik

Sieben traditionelle Sicherheitsschuhe (BAAK RICK und Sicherheitsschuhe von sechs unterschiedlichen Wettbewerbern (Auswahl durch BAAK)) und drei BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe (BAAK HENK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY) werden in der Materialprüfmaschine im Bereich der Zehengrundgelenks motorgetrieben auf 30°, 45° und 60° flektiert. Das für die Verformung notwendige Drehmoment wird mittels DMS basierten Drehmomenten Sensoren gemessen. Aus den Biege- und Drehmomentdaten wird die Biegesteifigkeit für die einzelnen Flexionsbereiche bestimmt. Weiterhin wird über das Kriechverhalten der Schuhe die Energiedissipation bzw. der Energieverlust abgeschätzt. Dazu wird die Abnahme des Drehmomentes, welches zur Aufrechterhaltung des Flexionswinkels notwendig ist, über drei Sekunden quantifiziert.

Für den Benchmark Test werden alle Schuhe anonymisiert und für den Untersucher unkenntlich gemacht.

### Ergebnisse

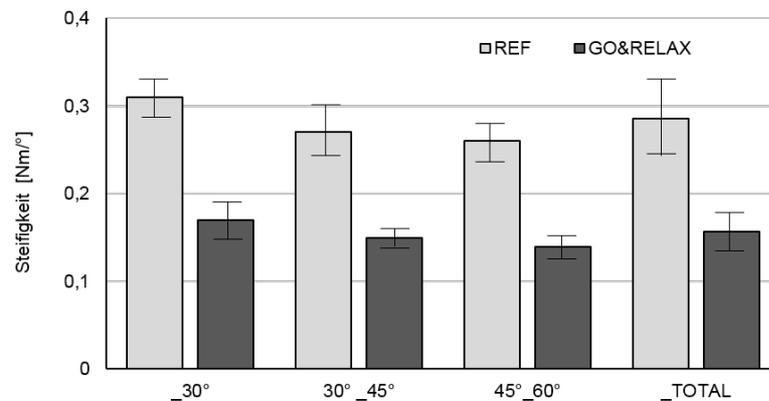
Abbildung 4 fasst die für die Biegung der Schuhe notwendigen Drehmomente für die Sohlenvorformung von 30°, 45° und 60° zusammen. Die sieben Referenzschuhe REF (Sicherheitsschuhe ohne BAAK Go&Relax) zeigen für alle Biegebereiche deutlich und signifikant größere externe Drehmomente als die drei BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe. Die Daten verdeutlichen, dass für die Verbiegung der REF Sicherheitsschuhe etwa doppelt so viel Drehmoment aufgebracht werden muss als für die entsprechende Verformung der BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe. Damit werden traditionelle Sicherheitsschuhe (REF) entweder die funktionelle Dorsalflexion der Zehengrundgelenke verhindern oder der Nutzer muss extrem hohe Muskelkräfte aufbringen, um die Sohlen longitudinal im Bereich der Zehengrundgelenke zu verformen.



**Abbildung 4:** Drehmomente zur Biegung der REF (n=7) und BAAK Go&Relax (n=3; BAAK HENK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY) Sicherheitsschuhe auf 30°, 45° und 60°. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler der Drehmomente für die beiden Schuhgruppen REF und BAAK Go&Relax.

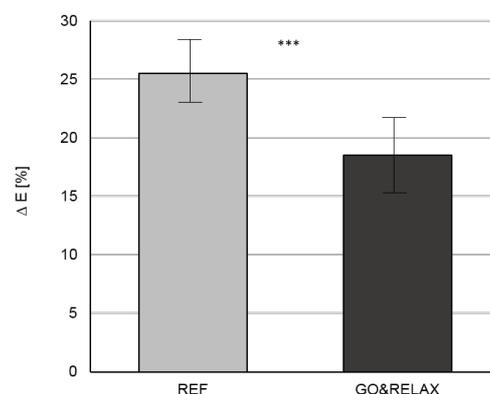
Die Steifigkeit der Schuhe in den Biegebereichen 0° bis 30°, 30° bis 45° und 45° bis 60° und damit der Widerstand gegen die Verformung ist bei den REF Sicherheitsschuhen doppelt so hoch wie bei den BAAK Go&Relax

Sicherheitsschuhen. Abbildung 5 fasst die Ergebnisse der Steifigkeitsmessung für die beiden Schuhgruppen und alle Biegebereiche zusammen und demonstriert zusätzlich die Steifigkeit für den gesamten Flexionsbereich (TOTAL). Bemerkenswert ist, dass sich die Biegesteifigkeit für alle drei Flexionsbereiche nahezu identisch zeigt.



**Abbildung 5:** Longitudinale Biegesteifigkeit der REF (n=7) und BAAK Go&Relax (n=3, BAAK HENK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY) Sicherheitsschuhe in den Flexionsarealen 0° bis 30°, 30° bis 45° und 45° bis 60° sowie für den gesamten Biegebereich (TOTAL). Dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler der Biegesteifigkeiten für die beiden Schuhgruppen REF und BAAK Go&Relax.

Die Untersuchung des Energieverlustes ( $\Delta E$ ) bei Flexion und Relaxation der Sohlen der untersuchten Sicherheitsschuhe (REF, BAAK Go&Relax) findet hoch signifikant ( $p < 0,01$ ) größere Energieverluste bei den traditionellen Sicherheitsschuhen (REF) als bei den BAAK Go&Relax Schuhen (Abbildung 6). Der Unterschied des Energieverlustes zwischen den Schuhgruppen von etwa 30 % ist biomechanisch in hohem Maße relevant, da über 80 % der für die Biegung der Sohle beim BAAK Go&relax System aufgebrauchten Energie bei der Extension der Zehengrundgelenke und damit beim finalen Abstoß vom Boden genutzt werden kann. Beim traditionellen Sicherheitsschuh dagegen werden, wenn die Sohle aufgrund der hohen Steifigkeit überhaupt gebogen wird, deutlich über 25 % der für die Verformung notwendigen Energie dissipiert und nur knapp 75 % stehen theoretisch für die Entformung der Sohle und die Streckung der Zehengrundgelenke zur Verfügung.



**Abbildung 6:** Energieverlust der REF (n=7) und BAAK Go&Relax (n=3; BAAK HENK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY) Sicherheitsschuhe bei Verformung und Relaxation. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler für die beiden Schuhgruppen REF und BAAK Go&Relax.

Innerhalb der untersuchten BAAK Produkte findet sich ein bemerkenswertes Ergebnis in Bezug auf die Energiedissipation für der Sohlenbiegung im Vorfußbereich. Der traditionelle Sicherheitsschuh BAAK RICK tritt

erwartungsgemäß mit Energieverlusten von über 25 % auf und verhält sich wie die übrigen REF Schuhe. BAAK HENK und BAAK RICK 2 (beide mit BAAK Go&Relax) zeigen signifikant geringere Dissipationswerte als BAAK RICK, unterscheiden sich aber deutlich vom Sicherheitsschuh BAAK UNITY. Dieser weist mit knapp unter 10 % den geringsten Energieverlust aller untersuchten Sicherheitsschuhe auf. Möglicherweise ist hier ein Grund für die hohe Akzeptanz des BAAK UNITY im Tragetest und die Perzeption eines entspannten Gangs zu finden.

## Diskussion

BAAK Go&Relax zeigt leichteres Biegeverhalten und setzt der Flexion der Sohle und damit auch der Zehengrundgelenke weniger Widerstand als der traditionelle Sicherheitsschuh entgegen. Der Energieverlust ist geringer als bei traditionellen Sicherheitsschuhen und die für die Sohlenbiegung aufgebraachte Energie kann bei Sicherheitsschuhen mit dem BAAK Go&Relax System effizienter als bei traditionellen Sicherheitsschuhen für den Abstoß genutzt werden.

BAAK Go&Relax Technologie erleichtert damit im Vergleich zum traditionellen Sicherheitsschuh den funktionellen Gang und die dabei wichtige Abwicklung des Fußes bis über die Zehengrundgelenke. BAAK Go&Relax bietet folglich die Voraussetzungen für eine komfortable und ermüdungsarme Fortbewegung und ein angenehmes, entspanntes Gehen. BAAK Go&Relax hilft, den energetischen Aufwand und vor allem den Energieverlust durch Sicherheitsschuhe bei jedem Schritt erheblich zu reduzieren. BAAK Go&Relax trägt damit maßgeblich zu einem ermüdungsfreien und komfortablen Gang bei.

## **Gang- und Belastungsanalyse bei normaler Lokomotion mit BAAK Go&Relax und traditionellen Sicherheitsschuhen.**

### **Untersuchungsziel**

Primärer Gegenstand dieser Studie ist die Untersuchung der 3D Kinematik und der mechanischen Belastung von Fuß-, Sprunggelenk und Kniegelenk beim normalen Gang mit BAAK Go&Relax und einem traditionellen Sicherheitsschuh.

In einer Erweiterung der grundlegenden Studie wird zudem der Effekt der BAAK Fitting Elemente im BAAK UNITY auf den Verlauf des Zentrums des plantaren Druck und des Kraftangriffspunktes, sowie die Belastungen von Sprunggelenk und Kniegelenk untersucht.

### **Methodik**

Achtzehn gesunde, männliche Probanden (Alter: 25 - 65 Jahre, Körpermasse:  $81,5 \pm 5,8$  kg, Körperhöhe:  $181,3 \pm 7,6$  cm) stellten sich für die Untersuchung zur Verfügung. Die Versuchspersonen absolvierten auf dem instrumentierten Gangsteg jeweils 10 Gangversuche mit konstanter und mittels Lichtschranke überprüfter Gehgeschwindigkeit mit den traditionellen Sicherheitsschuh BAAK RICK sowie den BBAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen BAAK RICK 2 und BAAK UNITY. Die individuelle Ganggeschwindigkeit wird von den Probanden frei gewählt, jedoch für alle Schuhbedingungen konstant gehalten.

In der ergänzenden Studie führen zehn zufällig ausgewählte Probanden weitere Versuche mit den drei BAAK Fitting Elementen im BAAK UNITY Sicherheitsschuh durch.

Alle Versuche werden von einem 10 Infrarot-Kamera System (Vicon Nexus) mit einer Aufnahme Frequenz von 200 Bildern/s erfasst und die 3D Kinematik der in Frage stehenden Gelenke über am Probanden aufgebrachte retroreflektierende Marker bestimmt. Eine im Boden eingelassene Kraftmessplattform (Kistler) gestattet die synchrone Erfassung der dreidimensionalen Bodenreaktionskräfte mit einer Aufnahme Frequenz von 1000 Hz. Auf dieser Kraftmessplattform wird eine EMED Druckmessplattform (Novel) mit 4 Sensoren pro  $\text{cm}^2$  aufgebracht, um zusätzlich die Druckverteilung unter dem Schuh zu beschreiben. Die plantare Druckverteilung im Schuh wird mit PEDAR Druckmesssohlen (Novel) mit 99 Einzelsensoren pro Sohle bei einer Messfrequenz von 200 Hz erfasst. Die Druckverteilungsmesssysteme gestatten auch die zeitabhängige Bestimmung der Lage des Druckzentrums (CoP: Center of Pressure). Alle Messsysteme sind zeitlich synchronisiert.

### **Ergebnisse**

Die gemessenen Bewegungen von Knie- und Sprunggelenk repräsentieren in der Sagittalebene bei allen Schuhinterventionen die bisher publizierten Daten zum normalen Gang in selbstgewählter Geschwindigkeit. In der Sagittalebene findet sich bei den Winkelverläufen des Knie- und Sprunggelenks während der Standphase und der Schwungphase keine Unterschiede zwischen den drei untersuchten Sicherheitsschuhen. Auch die entsprechenden resultierenden Drehmomente von Sprung- und Kniegelenk zeigen sich nicht von den bekannten Daten verschieden.

Die Winkelgeschwindigkeit des Sprunggelenks bei der primären Plantarflexion nach dem Fußaufsatz ergibt sich beim Sicherheitsschuh BAAK UNITY und BAAK RICK 2 signifikant kleiner als beim traditionellen BAAK RICK. Damit deutet sich an, dass die Abwicklung oder der „Ride“ bei den BAAK Go&Relax Modellen weicher ausfällt als beim traditionellen Sicherheitsschuh BAAK RICK. Die Art der Fersengeometrie scheint hier wirksam zu werden und den biomechanischen Zielen nach einer angenehmen und komfortablen Abwicklung nahezu ideal zu genügen. Der „Ride“ eines Schuhs wird aktuell im Zusammenhang mit dem Nutzungs- oder Tragekomfort diskutiert. Dabei wird

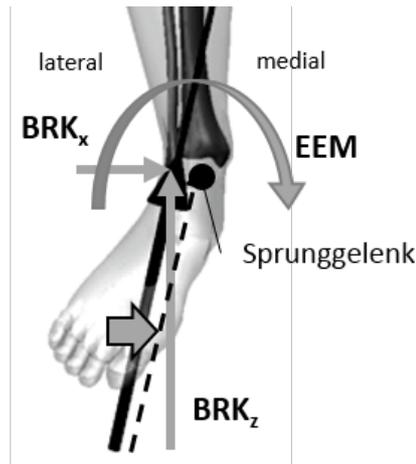
aktuell vorgeschlagen, den „Ride“ über die antero-posteriore Geschwindigkeit des CoP (Center of Pressure) in den ersten 30 % der Standphase zu evaluieren (C.K. Lam et al. 2017). Betrachtet man die mittlere Geschwindigkeit des CoP in den ersten 30 % der Standphase (Tabelle 1), findet sich diese beim BAAK UNITY mit  $0,51 \pm 0,04$  m/s am geringsten gefolgt vom BAAK RICK 2. Der traditionelle BAAK RICK zeigt mit  $0,61 \pm 0,08$  m/s die größte CoP Geschwindigkeit der untersuchten Schuhe. Der Unterschied der Mittelwerte von BAAK UNITY und BAAK RICK ist statistisch signifikant ( $p < 0,05$ ). Die untersuchte mittlere CoP Geschwindigkeit während der ersten 30 % des Stützes kann der aktuellen Diskussion in der Schuhbiomechanik folgend als geeignete Variable zur Beschreibung des „smooth ride“, also der weichen Abwicklung des Schrittes, gesehen werden. Ein solcher „smooth ride“ ist mit dem bestmöglichen Komfort beim Gang verbunden und kann somit zum Relaxen beim Gang beitragen. Es kann gezeigt werden, dass BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhs BAAK UNITY und BAAK RICK 2 einen signifikant besseren „smooth ride“ als der Referenzschuh BAAK RICK aufweisen und folglich den Gang als komfortable und entspannt erleben lassen.

Die Dauer der Standphase kann als weiterer Indikator für einen komfortablen und entspannten Gang herangezogen werden. Insbesondere durch eine hohe Biegefreudigkeit der Sohle im Bereich der Zehengrundgelenke kann eine schnelle und mit geringem Kraftaufwand verbundene Abwicklung erreicht werden. Die Dauer der Standphase findet sich bei beiden BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen (BAAK RICK 2 und BAAK UNITY) deutlich und hoch signifikant niedriger als beim traditionellen Sicherheitsschuh BAAK RICK (Tabelle 1). Die Dauer der Belastung des Fersenbereiches fällt dagegen bei den BAAK Go&Relax Schuhen länger, die Verweildauer im Mittelfußbereich kürzer und die Vorwärtsgeschwindigkeit des CoP niedriger als beim traditionellen Sicherheitsschuh aus. Zusammengefasst zeigt die Evaluation der Abwicklung oder der „Abrollverhaltens“ nachhaltig günstigere Komfortvariablen beim BAAK UNITY und beim BAAK RICK 2 als beim traditionellen Referenzschuh BAAK RICK.

Tabelle 1: Dauer der Standphasen (ms) und der CoP Geschwindigkeit (m/s). Mittelwerte und Standardabweichungen.

	BAAK RICK	BAAK RICK 2	BAAK UNITY
Dauer der gesamten Standphase, ms	$710,5 \pm 25,3$	$701,6 \pm 16,8$	$702,0 \pm 12,6$
Dauer der Fersenbelastung, ms	$150,6 \pm 23,8$	$153,0 \pm 35,7$	$155,1 \pm 20,2$
Dauer der Mittelfußbelastung, ms	$187,0 \pm 30,5$	$176,8 \pm 35,4$	$180,5 \pm 25,8$
Mittlere CoP Geschwindigkeit 30%, m/s	$0,61 \pm 0,08$	$0,55 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,04$

In der Frontalebene findet sich am Rückfuß eine signifikant größere Eversion (Innenkippung des Fußes) während des Bodenkontaktes beim BAAK RICK ( $9,5 \pm 2,8^\circ$ ) als bei den beiden untersuchten BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen (BAAK RICK 2:  $8,5 \pm 3,0^\circ$ ; BAAK UNITY:  $7,8 \pm 2,0^\circ$ ). Die asymmetrische Zehenschutzkappe, die Sohlentechnologie und das H-Koppel-Element medialisieren den Kraftangriffspunkt in der mittleren Standphase und sind so in der Lage, den Hebel der Bodenreaktionskraft zum Sprunggelenk in der Frontalebene zu reduzieren und damit das externe frontale Drehmoment am Sprunggelenk (EEM: externes Eversionsmoment) zu verkleinern (Abbildung 6). Da das EEM die Ursache für die Eversion (Innenkippung) des Rückfußes darstellt, wird mit Kontrolle des EEM durch BAAK Go&Relax die übermäßige Eversion des Rückfußes und letztlich die Pronation des Fußes reduziert und kontrolliert.

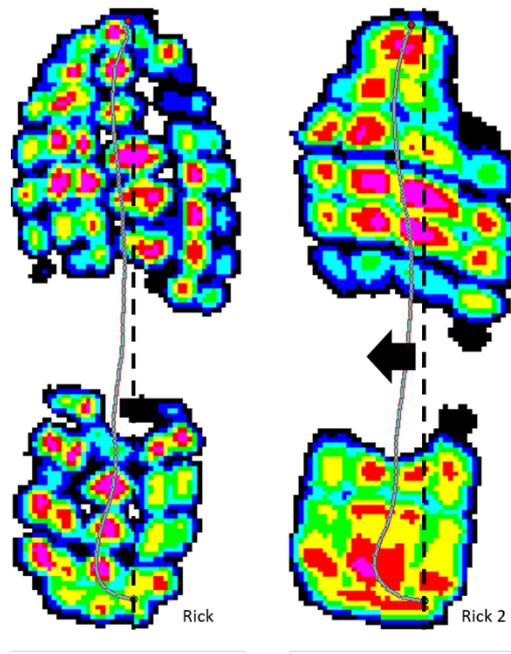


**Abbildung 6:** Externes Eversionsmoment (EEM) am Sprunggelenk in der Frontalebene während der Standphase beim Gang. Das EEM ist die Ursache für die Eversion der Ferse und die Pronation des Fußes. Die Eversion des Rückfußes hat zudem eine Medialisierung des Sprunggelenks zur Folge. Bei Medialisierung des Kraftangriffspunktes bzw. des CoP (grauer breiter Pfeil) durch BAAK Go&Relax reduziert sich der Hebel der Bodenreaktionskraft (BRK) am Sprunggelenk und folglich das externe Eversionsmoment.

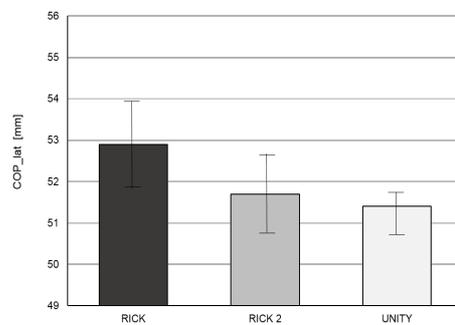
Mit einer reduzierten Eversion des Rückfußes ist auch die mediale Verschiebung des Sprunggelenks in der frühen Standphase bei den BAAK Go&Relax Schuhen gegenüber dem traditionellen BAAK RICK reduziert. Abbildung 7 demonstriert die mittleren Verläufe ( $n=18$ ) des CoP bei den Schuhbedingungen BAAK RICK und BAAK RICK 2. Es wird deutlich, dass der CoP bei BAAK RICK einen eher lateralen Verlauf zeigt, während der Kraftangriffspunkt bei der BAAK Go&Relax Bedingung nach medial wandert. Damit reduziert sich der Hebel für das externe Eversionsmoment am Sprunggelenk, der Rückfuß wird weniger in eine Eversion gezwungen. Gleichzeitig ist Medialisierung der distalen Tibia reduziert. Neben den Verläufen des Kraftangriffspunktes ist die Verteilung des maximalen vertikalen Drucks unter dem Schuh demonstriert. Unmittelbar nach dem Fußaufsatz im Bereich der Ferse medialisiert der Kraftangriffspunkt beim Schuh BAAK RICK 2, sodass der Hebel der Bodenreaktionskraft zum Sprunggelenk gegenüber dem beim Gang mit BAAK RICK bereits in der frühen Standphase reduziert wird. Die Folgen sind eine frühe Verringerung des externen Eversionsmomentes bei BAAK RICK 2 gegenüber BAAK RICK, eine geringere Eversion des Rückfußes und Pronation des Fußes und letztlich eine geringere mediale Verschiebung des Sprunggelenks und der distalen Tibia in der frühen und mittleren Standphase. Letzteres hat eine Reduktion der Adduktion des Kniegelenks und Verringerung der Belastung des medialen Kompartiments des Kniegelenks zur Folge.

Die Quantifizierung der lateralen Position des CoP in der mittleren Standphase findet sich in Abbildung 8. Es wird deutlich, dass die Medialisierung des CoP im Mittel nur im Millimeterbereich beobachtet wird; bei Berücksichtigung der recht geringen Größe des Hebels der Bodenreaktionskräfte am Sprunggelenk in der Frontalebene sind die Effekte für die Rückfußversion und die Medialisierung der distalen Tibia jedoch erheblich.

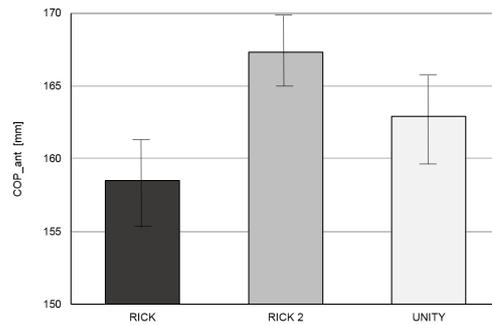
In der antero-posterioren Richtung findet sich eine deutliche Verlängerung des CoP Verlaufs in der Phase der Mittelfußbelastung beim BAAK RICK 2 gegenüber dem traditionellen BAAK RICK (Abbildung 9). Beim BAAK UNITY wird früher und schneller der Vorfuß erreicht und die anteriore Verlängerung des CoP findet sich eher in der Phase der Belastung des Vorfußes.



**Abbildung 7:** Verlauf des Kraftangriffspunktes (Mittelwert aller Probanden und Schritte) und Druckverteilung unter dem Schuh beim Gehen mit BAAK RICK (links) und BAAK RICK 2(rechts). Der Kraftangriffspunkt erfährt beim BAAK Go&Relax Sicherheitsschuh BAAK RICK 2 gegenüber dem traditionellen Sicherheitsschuh BAAK RICK eine frühe Medialisierung (schwarzer Pfeil) nach dem Fußaufsatz im Fersenbereich. Dargestellt ist der rechte Fuß bzw. Schuh.



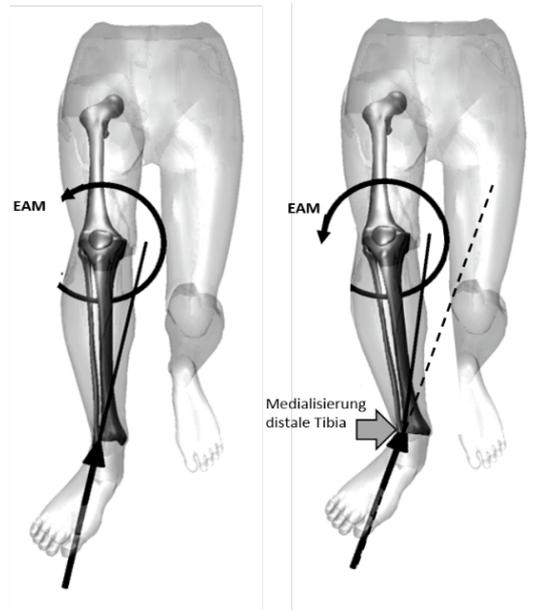
**Abbildung 8:** Mittlere laterale Lage des CoP während der Mittelfußbelastung bei BAAK RICK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Probanden und alle Schritte. Ein kleinerer Wert für COP\_lat kennzeichnet eine Medialisierung des CoP. Eine relative Medialisierung des CoP weist auf einen reduzierten Hebel der Bodenreaktionskraft zum Sprunggelenk in der Frontalebene hin, reduziert das externe Eversionsmoment am Sprunggelenk und führt zu einer reduzierten Eversion des Rückfußes und zu einer verringerten Pronation.



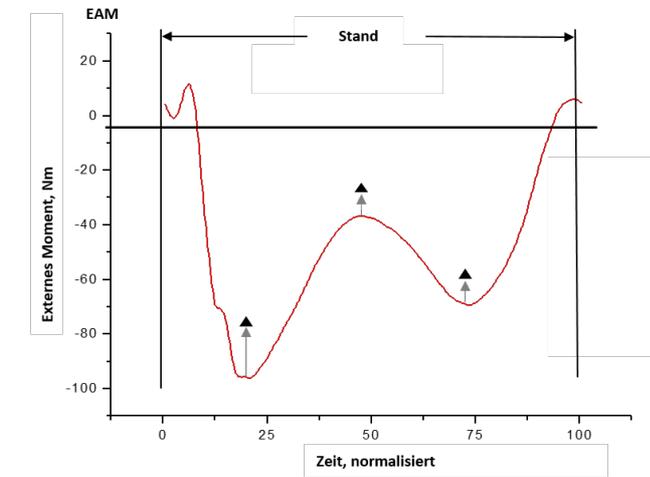
**Abbildung 9:** Mittlere anteriore Lage des CoP während der Mittelfußbelastung bei BAAK RICK, BAAK RICK 2, BAAK UNITY. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Probanden und alle Schritte. Ein größerer Wert für COP\_ant kennzeichnet eine mehr anteriore Lage des CoP. Eine relative Anteriorisierung des CoP weist auf einen vergrößerten Hebel der Bodenreaktionskraft zum Sprunggelenk in der Sagittalebene hin, erhöht das externe Dorsiflexionsmoment am Sprunggelenk und führt zu einer besseren Ausnutzung der elastischen Komponenten der Plantarflexoren (Wadenmuskeln).

Die Technologie BAAK Go&Relax ist nach diesen Ergebnissen nachhaltig in der Lage, den Verlauf des CoP und des Kraftangriffspunktes sowohl in medialer als auch in anteriorer Richtung zu verändern und zu kontrollieren. Damit gelingt BAAK Go&Relax vor allem, die Eversion des Sprunggelenks zu reduzieren, indem die Ursache für diese Rückfußbewegung (Reduktion des externen Eversionsmomentes (EEM)) Änderung erfährt. BAAK Go&Relax Technologie versucht nicht, die Wirkung eines durch einen Schuh häufig erhöhten frontalen Drehmomentes (exzessive Rückfußversion) durch steifes, wenig komfortables Posting auf der medialer Schuhseite oder andere Technologien zu kontrollieren bzw. rückgängig zu machen, sondern wirkt unmittelbar an den Ursachen des Problems der übermäßigen, ermüdenden und unphysiologischen Pronation des Fußes während der frühen Standphase bei jedem Schritt.

Die Folgen der reduzierten Eversion des Rückfußes und einer verringerten medialen Translation des Sprunggelenks und damit der distalen Tibia bei BAAK Go&Relax gegenüber dem Schuh BAAK RICK sind eine geringere Innenrotation der Tibia (Unterschenkel) bei gleichzeitig reduzierter Adduktion des Kniegelenks. BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhe reduzieren infolgedessen gegenüber dem traditionellen Sicherheitsschuh die beiden Variablen der kritischen Belastung des Kniegelenks, nämlich die Knieinnenrotation (relative Innenrotation der Tibia gegenüber dem Oberschenkel) und vor allem das externe Adduktionsmoments am Kniegelenk (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Das externe Adduktionsmoment am Kniegelenk (EAM). Das EAM wird durch Medialisierung der distalen Tibia (rechts) vergrößert. Damit wird die Belastung des medialen Kompartiments des Kniegelenks bei jedem Schritt erhöht und die Gefahr der medialen Überbeanspruchung und Progression der medialen Arthrose vergrößert. Beim traditionellen Sicherheitsschuh (rechts) findet sich gegenüber der BAAK Go&Relax Technologie (links) ein erhöhte Medialisierung der distalen Tibia und infolgedessen eine Vergrößerung des EAM am Kniegelenk.



**Abbildung 11:** Verlauf des externen Adduktionsmomentes am Kniegelenk beim Gehen. Die durchgezogene rote Linie gibt das mittlere Adduktionsmoment (Mittelwert über 20 Bodenkontakte) für einen Probanden beim Gehen mit den traditionellen Sicherheitsschuh BAAK RICK wieder; die gefüllten Dreiecke ( $\Delta$ ) kennzeichnen die Veränderung des EAM bei dem gleichen Probanden durch Verwendung der BAAK Go&Relax Technologie (BAAK UNITY) und zeigen eine deutliche Reduktion des EAM in der gesamten Standphase.

Mit den BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen wird das externe mittlere Adduktionsmoment (EAM) am Kniegelenk während der Standphase gegenüber der Referenz BAAK RICK um bis zu 25 % reduziert (vergleiche Abbildung 11). Dieses Ergebnis ist von besonderer Bedeutung, da das EAM die wichtigste Belastungsvariable des medialen Kompartiments des Kniegelenks darstellt und mit der Entwicklung und Progression der medialen Gonarthrose in

Verbindung steht. Damit kann der BAAK Go&Relax Sicherheitsschuh möglicherweise zu einer Reduktion des Risikos der medialen und damit der häufigsten Arthrose des Kniegelenks beitragen.

Es kann festgehalten werden, dass BAAK Go&Relax in der Lage zu sein scheint, die Belastung des medialen Teil des Kniegelenks durch eine verringerte Adduktion gegenüber bisherigen Sicherheitsschuhtechnologien ohne BAAK Go&Relax zu reduzieren. Da die maximale Eversion des Rückfußes bei der BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen (BAAK RICK 2 und BAAK UNITY) gegenüber der Referenz (BAAK RICK) reduziert ist und die Eversion des Rückfußes mit der Innenrotation der Tibia gekoppelt ist, zeigt sich die Knieinnenrotation als zweite Risikovariablen für Überbeanspruchungen des Kniegelenks bei BAAK Go&Relax gegenüber der Referenz verringert.

Mit einer reduzierten Adduktion des Kniegelenks wird eine verringerte Abduktion des Hüftgelenks einhergehen, sodass mit einer Beeinflussung der Beckenkipfung durch den BAAK Go&Relax Sicherheitsschuh gerechnet werden kann. Eine Verringerung der Beckenkipfung in der Frontalebene und möglicherweise eine reduzierte Beckenrotation in der Transversalebene können mit einer Veränderung der Beanspruchung der lumbalen Wirbelsäule in einen logischen Zusammenhang gebracht werden. Eine Beeinflussung der mechanischen Belastung zumindest der lumbalen Wirbelsäule und des thorako-lumbalen Übergangs zur Brustwirbelsäule durch den Schuh beim Gehen ist biomechanisch schlüssig. Es ist anzunehmen, dass der geeignete Sicherheitsschuh über die Reduktion der am Kniegelenk wirkenden resultierenden Drehmomente in der Frontalebene (EAM) die frontalen und transversalen Momente am Hüftgelenk und damit auch am lumbo-sakralen Übergang und folglich an der Wirbelsäule zu beeinflussen in der Lage ist. Beim Gehen mit Schuhen der BAAK Go&Relax Technologie ist mit einer Reduktion der transversalen Rotation und der Skoliose zumindest der lumbalen Wirbelsäule zu rechnen.

**BAAK Fitting Elemente:** In einer Erweiterung der biomechanischen Untersuchungen werden drei BAAK Fitting Elemente (blau, grün, rot) an 10 der 18 Probanden im BAAK UNITY geprüft. Dabei werden die Fitting Elemente in der antero-posterioren Ausrichtung den individuellen Fußgewölben angepasst.

Es kann nachgewiesen werden, dass die Fitting Elemente die kraftübertragende Kontaktfläche des Fußes zum Schuhboden um bis zu 10 % vergrößern können und damit der mittlere und maximale plantare Druck reduziert werden kann. Das biomechanisch wichtige Resultat ist die Möglichkeit der Medialisierung des CoP während der gesamten Standphase, was in der Mehrzahl der Fälle zu einer Reduktion des externen Eversionsmomentes am Sprunggelenk und infolgedessen einer Verringerung des externen Adduktionsmomentes am Kniegelenk führt. Der größte Effekt kann für das Fittingelement „grün“ gefolgt von „blau“ nachgewiesen werden, wobei naturgemäß die Wirksamkeit der verschiedenen Fittingelemente hoch individuell ist. Ein Fuß mit einer hohen und steifen Wölbung reagiert auf die Elemente anders als ein weicher Fuß mit flacher Längswölbung.

Die BAAK Fitting Elemente sind somit zu einem individuellen Tuning der Lage des CoP geeignet und können ideal auf unterschiedliche Geometrien und Steifigkeiten der Längswölbung des Fußes eingehen.

## Zusammenfassung und Diskussion

Die Ursache für die reduzierte Eversion des Rückfußes bei BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhen gegenüber der Referenz ist eine Medialisierung des Kraftangriffspunktes der Bodenreaktionskräfte und des CoP (Center of Pressure). Es wurde deutlich, dass BAAK UNITY und BAAK RICK 2 gegenüber BAAK RICK eine signifikante Medialisierung des CoP über die frühe und mittlere Standphase bewirken und folglich zu einer Reduktion des externen Momentes in der Frontalebene am Sprunggelenk mit Folge einer reduzierten Eversion des Rückfußes und verringerten Pronation des Fußes führen. Mit Reduktion der Eversion verringert sich die Medialisierung des Sprunggelenks in der frühen und mittleren Standphase, was eine Verringerung des externen Adduktionsmomentes am Kniegelenk mit gleichzeitiger Reduktion der Belastung auf dem medialen Kompartiment des Knies zur Folge hat. Der BAAK Go&Relax Sicherheitsschuh wird damit über die Zeit der Nutzung möglicherweise nicht nur zu einem komfortablen Gang sondern auch zu einer Reduktion des Risikos der Progression der medialen Arthrose am Kniegelenk beitragen können. Ein weiterer Effekt wird eine Modifikation der Belastung des Beckens und in Folge der lumbalen Wirbelsäule sein, wobei durch den Bottom-up Effekt des BAAK Go&Relax Sicherheitsschuhs primär mit einer Modifikationen der Belastung der lumbalen Wirbelsäule in Bezug auf Torsion und Lateralflexion zu rechnen ist.

Die technische Ursache kann in der asymmetrischen Zehenschutzkappe, im H-Koppel-Element der Mittelsohle, in der Sohlengeometrie des Fersenbereiches und in der geeigneten Belastungsführung des lateralen Fußes (4. und 5. Strahl) und des medialen Fußes (1. bis 3. Strahl) im Lauf der Fußabwicklung durch die optimierte Flexzone im Vorfuß und kontrollierte Torsion von Vorfuß und Ruckfuß gesehen werden. Damit gelingt zudem in der späten Stand- und Abdruckphase beim BAAK UNITY und auch beim BAAK RICK 2 eine deutliche Medialisierung des CoP gegenüber der BAAK RICK Referenz, welche die funktionelle Re-Supination für den Abdruck gestattet und somit auch den Abstoß vom Boden komfortabel und dynamisch effizient erscheinen lässt. Technisch wird dieser biomechanische Vorteil von BAAK Go&Relax durch die asymmetrische Zehenkappe und die Geometrie der Flexzonen in der Mittelsohle und der Laufsohle erzielt.

Die biomechanische Untersuchung von 18 Probanden und drei Sicherheitsschuhen konnte nachhaltig die Effekte des Konzeptes BAAK Go&Relax in Bezug auf das Sprunggelenk, das Kniegelenk sowie die Abwicklung des Vorfußes nachweisen. Es konnte nachhaltig demonstriert werden, dass eine mediale Verschiebung des Kraftangriffspunktes durch BAAK Go&Relax zu einer Reduktion des externen Eversionsmomentes am Sprunggelenk und in Folge des externen Adduktionsmomente am Knie führt. Eben diese Reduktion von EEM und EAM ist mit einer Reduktion der Belastung des medialen Kniegelenkes in Verbindung zu bringen und kann möglicherweise eine Risikoreduktion der Progression der medialen Gonarthrose bewirken. Diese positiven Effekte können auch die Biomechanik des Beckens und der lumbalen Wirbelsäule beeinflussen, indem die transversale Rotation kontrolliert und gleichzeitig die Lateralflexion der lumbalen Säule kontrolliert wird.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass BAAK Go&Relax gegenüber der Referenz BAAK RICK zu einer signifikanten Verbesserung eines „smooth ride“ im Übergang von der Rückfuß- zur Vorfußbelastung führt. Damit ist BAAK Go&Relax in der Lage, den entspannten Gang zu fördern und Gangkomfort deutlich zu erhöhen. Letztlich erlaubt BAAK Go&Relax eine funktionelle und vor allem biomechanisch zweckmäßige Vorfußabwicklung und einen biomechanisch effizienten Abstoß. Damit kann die BAAK Go&Relax Technologie die Gangeffizienz verbessern, die elastischen Komponenten der Muskel-Sehnen-Einheiten der Antriebsmuskeln effizient nutzen und somit zu einer entspannten Fortbewegung im Vergleich zu der mit einem traditionellen Sicherheitsschuh führen.